http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0712

航天员受银河宇宙线辐射的剂量计算

张斌全*，余庆龙，梁金宝，孙越强，杨垂柏，张珅毅

(中国科学院 国家空间科学中心，北京 100190)

摘 要: 在近地空间(LEO)和深空探测中，航天员遭受的辐射风险主要来自于银河宇宙线(GCR)照射. 银河宇宙线的辐射剂量是航天员辐射风险评价的基础. 国际放射防护委员会(ICRP)于2013年提出了新的航天员空间辐射剂量估算方法，以更准确给出空间重离子辐射的剂量. 基于此方法，开发了宇宙线粒子在物质中输运的蒙特卡罗程序，并在程序中实现用中国成年男性人体数字模型来仿真航天员. 采用该程序计算了粒子($Z=1\sim92$)各向同性照射航天员时器官的通量-器官剂量转换因数，并估算出航天员在近地轨道空间受银河宇宙线辐射的剂量.

关 键 词: 空间辐射; 银河宇宙线(GCR); 航天员; 辐射剂量; 蒙特卡罗
中图分类号: V520.6
文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2015)11-2044-08

空间中的质子、电子、重离子、中子和 X 射线等辐射是威胁航天员健康和安全的环境要素. 近 20 年，国际和我国的载人航天事业均有了很大发展，更多航天员参与空间活动，航天员在空间停留的时间也更长，接受越来越多的空间辐射照射. 不同于以 X 射线、γ 射线和中子为主的地面辐射，空间辐射含有高传能线密度(LET)的银河宇宙线(GCR). 银河宇宙线是指产生于太阳系外银河的高能带电粒子. 银河宇宙线的成份包含约 2% 电子和约 98% 的原子序数 $1\sim92$ 的原子核，原子核以质子(约 87%)和 α 粒子(约 12%)为主，重核仅占约 1%. Cucinotta 等[1]研究发现器官剂量当量的 80% 以上来自于银河宇宙线; El-Jaby 等[2]通过计算国际空间站上航天员的剂量，发现在 2 cm 铝屏蔽下银河宇宙线对航天员剂量当量的贡献为 85%，在 10 cm 铝屏蔽下的贡献为 75%. 因此，银河宇宙线辐射剂量的计算和监测是航天员空间辐射风险评估的重要工作.

长期以来，国际上对航天员辐射剂量估算主要依据国际放射防护委员会(ICRP)的第 26 号[3]和第 60 号[4]出版物，航天员器官的剂量当量 H_T 等于器官吸收剂量 D_T 与辐射品质因数的乘积. 辐射品质因数是反映不同辐射危害大小的量，ICRP 60 号出版物把辐射品质因数认为是 LET 的函数.

然而研究表明，辐射品质因数不仅与辐射 LET 值有关，还与粒子的类型、能量和辐射效应类型有关[5]. 对于 LET 值相同、类型不同的粒子，它们产生的辐射效应不同，以 LET 为函数的辐射品质因数不能准确反映辐射的生物学效应.

2013 年，ICRP 发布了第 123 号出版物——《航天员空间辐射照射的评价》[6]. 该出版物在大量重离子生物学效应研究的基础上，提出了新的用于航天员辐射剂量计算的辐射品质因数. 该因数不再仅是 LET 的函数，而是与辐射粒子原子序数、能量和辐射效应类型有关，更真实反映粒子辐射的生物效应. 有必要研究与 ICRP

收稿日期: 2014-11-18; 录用日期: 2015-02-12; 网络出版时间: 2015-05-13 09:13
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20150513.0913.001.html
基金项目: 国家自然科学基金(11305234)
* 通讯作者: 张斌全(1979—)，男，广西博白人，副研究员，zhangbinquan@nssc.ac.cn，主要研究方向为空间辐射探测和辐射剂量学.

引用格式: 张斌全，余庆龙，梁金宝，等. 航天员受银河宇宙线辐射的剂量计算[J]. 北京航空航天大学学报，2015，41(11): 2044-2051. Zhang B Q, Yu Q L, Liang J B, et al. Calculation of the astronauts' radiation dose from galactic cosmic ray[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(11): 2044-2051 (in Chinese).

123 号出版物相适应的航天员辐射剂量监测评估方法.

本文采用人体数字模型模拟航天员，通过蒙特卡罗程序仿真粒子在航天员体内的输运，结合 ICRP 123 号出版物，计算出粒子通量-航天员剂量转换系数，并由银河宇宙线模型给出近地空间的宇宙线强度，进一步计算出银河宇宙线对航天员的辐射剂量.

1　模型和方法

1.1　人体数字模型

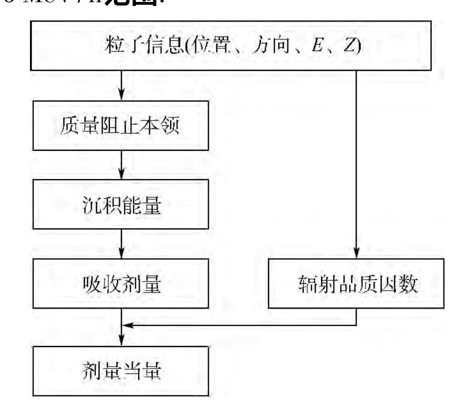
由于不能对人体内的辐射剂量进行直接测量，人体组织或器官的辐射剂量一般通过体表测量或模拟计算的方式得到. 尤其是近十多年来，各国先后开发了大量的人体数字模型，把人体划分为大量的小体积单元(体素) ，通过核磁共振成像(MRI) 、计算机断层扫描(CT) 或切割断层图片可得到各体素所属的组织器官，结合粒子输运程序以研究人体受空间辐射的剂量[7-14].

本工作中采用 CNMAN 人体数字模型[15]. 该模型基于第三军医大学采集的虚拟人数据集建立. 数据集的标本来自身高 170 cm，体重 65 kg 的成年男性. 通过对标本的切割解剖，获取到 1 700 多个解剖断面，对每个断面进行照相，分辨率达到 630 万像素. 基于每一个断面的照片，经图像处理后重新构建出人体三维数字模型. 该人体数字模型把人体划分出 29 个组织器官，每个组织器官由大量的体素组成，体素体积为 0.16 mm × 0.16 mm × 1.0 mm. CNMAN 是专用于辐射剂量评估的人体数字模型，在辐射防护领域的研究和应用中发挥作用[16-18].

1.2　剂量计算方法

航天员空间辐射剂量的计算大多采用模拟粒子输运的 Geant4[19]、MCNP[20] 和 Fluka[21] 等通用蒙特卡罗软件. 然而，依据 ICRP 123 号出版物，需要对粒子在体内的输运全过程进行跟踪，针对每一能量的粒子计算其辐射品质因数，通用蒙特卡罗软件在此方面的应用存在困难. 为此需开发新的航天员辐射剂量计算程序.

航天员辐射剂量计算程序采用 Fortran 90 语言编写. 航天员组织器官的吸收剂量和剂量当量的计算过程如图 1 所示: 通过随机抽样出粒子的位置和方向，把粒子位置、方向、能量和原子序数等信息作为输入，计算粒子穿过人体数字模型各体素时的质量阻止本领和辐射品质因数，进一步得到粒子在各体素的沉积能量、吸收剂量和剂量当量，最后对各组织或器官的所有体素的吸收剂量和剂量当量求和，得到组织或器官的吸收剂量和剂量当量. 计算中，源粒子随机抽样为各向同性照射，原子序数从 1 ~ 92，能量覆盖 1 ~ 20 000 MeV/n范围.



E—粒子能量; Z—粒子原子序数.

图 1　航天员器官剂量计算流程

Fig. 1　Process to calculate astronauts' organ dose

粒子的质量阻止本领是带电粒子穿过单位质量长度所损失的能量，基于 Bethe-Bloch 理论编程计算得到. 图 2 是程序计算结果实线与 SRIM[22] 程序计算值虚线的比较，两者结果吻合.

粒子在体素 i 内的沉积能量 ΔE_i (单位: MeV) 为

$$\Delta E_i = \sum_{j=1}^{n} S_j \Delta x \tag{1}$$

式中: S_j 为粒子的质量阻止本领，MeV/(mg · cm^{-2}) ; 假设粒子在体素内穿过的质量长度为 Δd，mg · cm^{-2}，把其分为 n 等份(本计算中 n = 100) ，$\Delta x = \Delta d / n$.

体素 i 的吸收剂量 D_i 等于沉积能量除以体素的质量:

$$D_i = \frac{\Delta E_i}{m_i} \tag{2}$$

式中: m_i 为体素 i 的质量.

体素 i 的剂量当量 H_i 为

$$H_i = D_i \times Q_i \tag{3}$$

式中: Q_i 为入射到体素 i 的粒子的辐射品质因数. 依据 ICRP 123 号出版物，空间粒子的辐射品质因数为粒子能量 E 和原子序数 Z 的函数，计算式为

$$Q_i = (1 - P_{Z,E}) + 6.24 \times \left(\frac{\Sigma_0}{\alpha_\gamma L}\right) \times P_{Z,E} \tag{4}$$

式中: $P_{Z,E} = \{1 - \mathrm{e}^{[-Z^{*2}/(k\beta^2)]}\}^m$，$\beta$ 为粒子速度与光速之比，Z^* 为有效原子序数; L 为传能线密度;

Σ_0,m,k 和 α_γ 为与辐射效应有关的参数. 对于实体癌,NASA 推荐建议 $m=3$,$k=550$(1 000,$Z\leqslant 4$),$\Sigma_0/\alpha_\gamma=7\,000/6.24$[23].

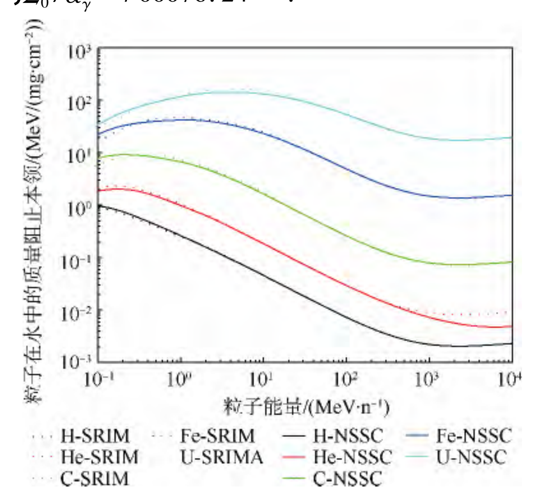


图 2 不同粒子在水中的质量阻止本领

Fig. 2 Stopping powers of various particles in water

根据 ICRP 123 号出版物计算出 ^{1}H、^{4}He、^{12}C、^{28}Si、^{56}Fe、^{91}Zr、^{197}Au 和 ^{238}U 等粒子的辐射品质因数及其与 ICRP 60 号出版物的品质因数比较如图 3 所示. ICRP 60 号出版物推荐的辐射品质因数随传能线密度 L 变化在总体趋势上与 ICRP 123 号出版物的一致,然而在某些 L 值,两个出版物给出的辐射品质因数差别可达数倍.

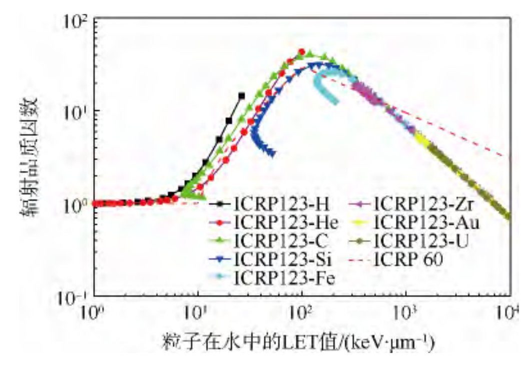


图 3 ICRP 123 与 ICRP 60 出版物的辐射品质因数

Fig. 3 Radiation quality factor from ICRP 60 and ICRP 123 publications

器官 T 的吸收剂量和剂量当量分别由组成该器官的所有体素的吸收剂量和剂量当量求和得到:

$$D_T=\sum_{i=1}^{k'}D_i \tag{5}$$

$$H_T=\sum_{i=1}^{k'}H_i \tag{6}$$

式中:k'为组成器官 T 的体素数量.

最后,把器官 T 的吸收剂量和剂量当量除以源粒子的通量,分别得到通量-吸收剂量转换因数和通量-剂量当量转换因数.

1.3 银河宇宙线模型

为了得到近地轨道空间的银河宇宙线通量,以利用上述转换因数来评估航天员所受的银河宇宙线辐射剂量,采用了 SPENVIS[24] 程序中的 CRÈME 96 银河宇宙线模型. 该模型给出太阳活动低年的银河宇宙线强度,考虑了地磁作用. 计算得到的国际空间站轨道(International Space Station,ISS)(远地点 365 km,近地点 345 km,倾角 52°)银河宇宙线 ^{1}H、^{4}He、^{12}C、^{40}Ar、^{56}Fe 和 ^{238}U 等部分银河宇宙线粒子的微分能谱如图 4 所示,在 10 MeV/n能量之下的粒子主要是异常宇宙线,^{1}H 粒子的通量比 ^{238}U 粒子通量高 10 个数量级.

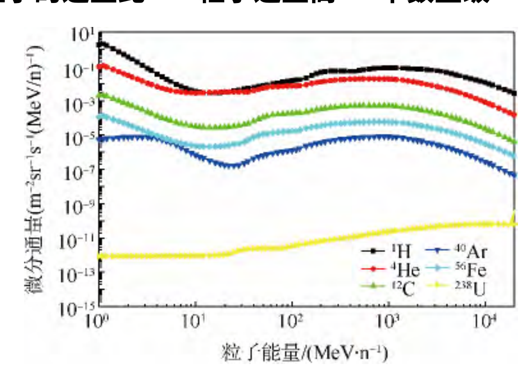


图 4 国际空间站轨道银河宇宙线粒子(^{1}H、^{4}He、^{12}C、^{40}Ar、^{56}Fe 和 ^{238}U)的能谱

Fig. 4 Energy spectra of GCR particles (^{1}H, ^{4}He, ^{12}C, ^{40}Ar, ^{56}Fe and ^{238}U) in ISS orbit

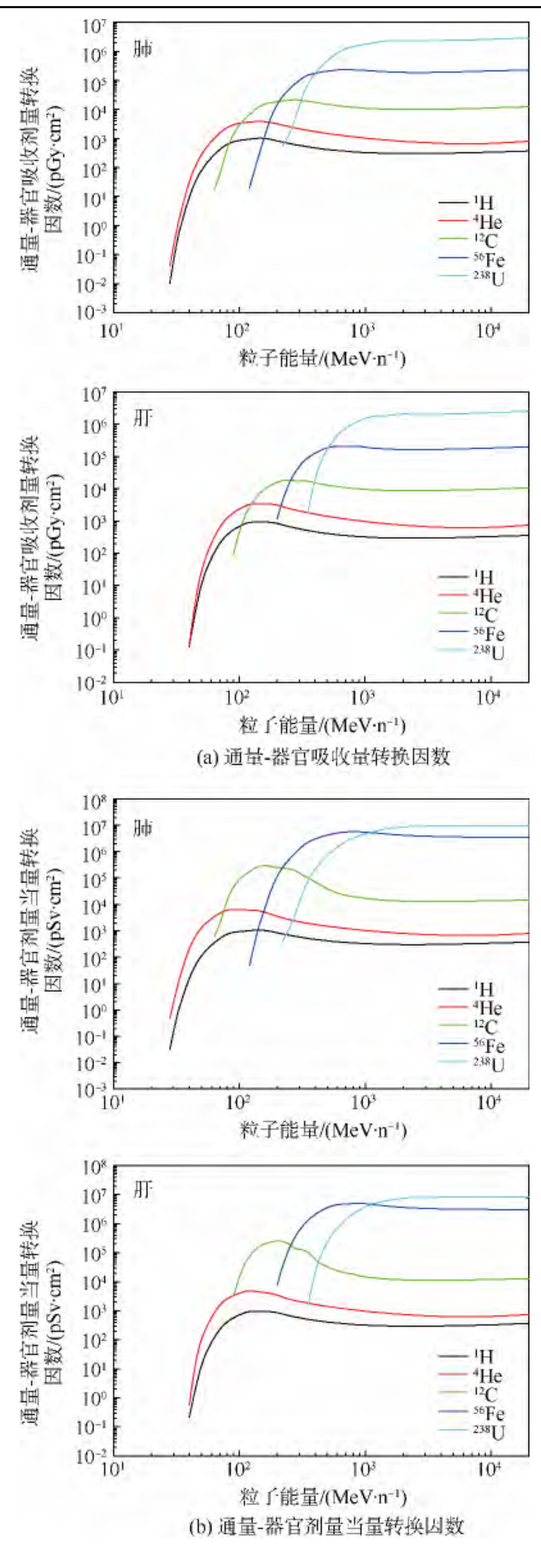
2 结果与分析

2.1 剂量转换因数

计算程序运行在 Windows 7 环境,处理器频率为 1.6 GHz,内存为 4.0 GB. 对于每一种原子序数 1~92 的粒子,仿真计算 10^5 个粒子需要时间约 32 h.

通过计算获得了人体在不同铝屏蔽厚度(0、2、5、10 g/cm^2)下,受不同粒子照射时主要组织器官的通量-吸收剂量转换因数和通量-剂量当量转换因数.

人体的肺和肝在 ^{1}H、^{4}He、^{12}C、^{56}Fe 和 ^{238}U 粒子照射下,其通量-吸收剂量转换因数和粒子通量-剂量当量转换因数分别见图 5(a)和图 5(b). 从图 5中看出,器官在同一种粒子照射时,其转换因数随粒子能量升高而增大,然后趋于一个常数值,这是因为高能量的粒子在器官中的阻止本领趋于常数(见图 2),它们在器官中的沉积能量差别不大. 对于高能量如大于 10^3 MeV/n 的粒子,通量-吸收剂量转换因数和通量-剂量当量转换因数随粒子原子序数增大而增大.



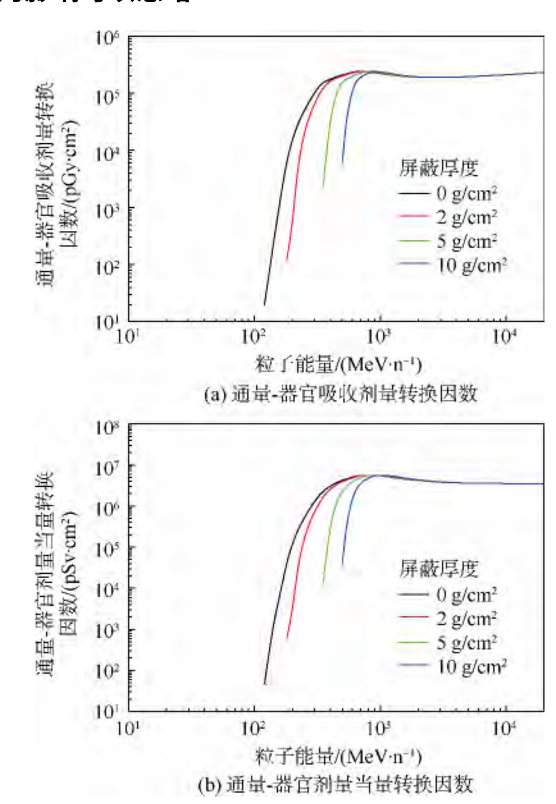
(a) 通量-器官吸收量转换因数

(b) 通量-器官剂量当量转换因数

图 5　受^{1}H、^{4}He、^{12}C、^{56}Fe 和 ^{238}U 粒子照射时通量-器官吸收剂量转换因数和通量-器官剂量当量转换因数

Fig. 5　Fluence to organ absorbed dose conversion coefficients and organ dose equivalent conversion coefficients for exposure by ^{1}H, ^{4}He, ^{12}C, ^{56}Fe and ^{238}U

在不同屏蔽厚度下人体分别受^{56}Fe 粒子照射时，肺的通量-吸收剂量转换因数和通量-剂量当量转换因数分别见图 6(a) 和图 6(b). 可以看出，屏蔽厚度主要影响低能量粒子通量-剂量转换因数，可使转换因数降低，对于高能量粒子($>10^{3}$ MeV/n)，转换因数几乎不发生变化，屏蔽的影响可以忽略.



(a) 通量-器官吸收剂量转换因数

(b) 通量-器官剂量当量转换因数

图 6　不同屏蔽厚度下^{56}Fe 粒子照射时的通量-器官吸收剂量转换因数和通量-器官剂量当量转换因数

Fig. 6　Fluence to organ absorbed dose conversion coefficients and organ dose equivalent conversion coefficients for exposure by ^{56}Fe with various shielding thicknesses

人体在^{1}H、^{4}He、^{12}C 和^{56}Fe 等粒子照射下，计算出肺、肝、甲状腺、皮肤和大脑的通量-吸收剂量转换因数、通量-剂量当量转换因数与 ICRP 123 号出版物结果的比较分别见图 7(a) 和图 7(b). 从图中可看出，计算结果与 ICRP 结果有较好的一致性，尤其是皮肤的转换因数与 ICRP 结果比较吻合，其他组织器官的有差别，最大可达数十倍，随着粒子能量升高，这种差别减小. 这主要是由于 CNMAN 人体模型与 ICRP 人体模型在器官的位置、体积、形状等方面存在差异造成的，计算方法的不同也会带来差别.

2.2　近地轨道航天员的辐射剂量

利用上述计算的通量-剂量转换因数和来自 CRÈME 96 模型的银河宇宙线通量，可计算出近地国际空间站轨道航天员受银河宇宙线辐射照射的剂量率. 一些组织器官在不同屏蔽厚度下的吸

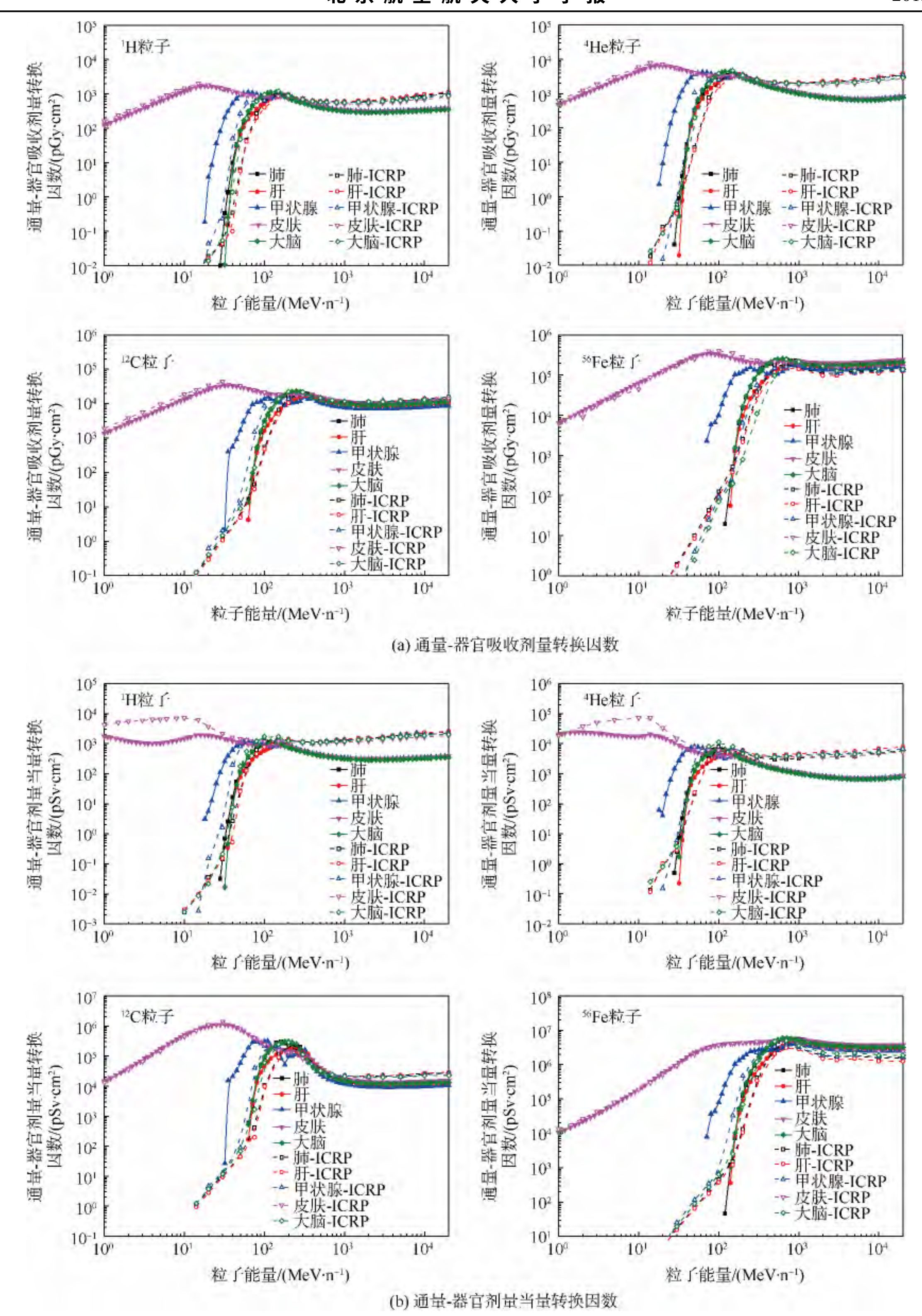
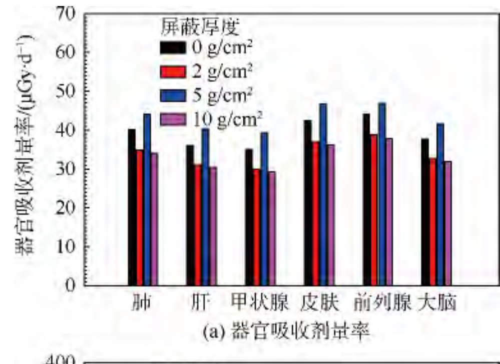


图 7 计算的通量-器官吸收剂量转换因数和通量-器官剂量当量转换因数与 ICRP 123 结果的比较

Fig. 7 Comparisons of fluence to organ absorbed dose conversion coefficients and organ dose equivalent conversion coefficients calculated with results from ICRP 123

收剂量率和剂量当量率分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示. 从结果发现,航天员受银河宇宙线辐射时器官的剂量率不是随屏蔽厚度增加而降低,在 5 g/cm² 屏蔽厚度下接受银河宇宙线辐射的吸收剂量率要大于无屏蔽时的剂量率. 这是由于屏蔽虽然阻止了部分粒子照射航天员,但同时使透过粒子的能量降低,而低能量粒子在人体内的沉积能量增大,可导致吸收剂量增加. 而 5 g/cm² 屏蔽时器官的剂量当量率与无屏蔽时剂量当量率接近,大于2 g/cm²屏蔽的剂量当量率.



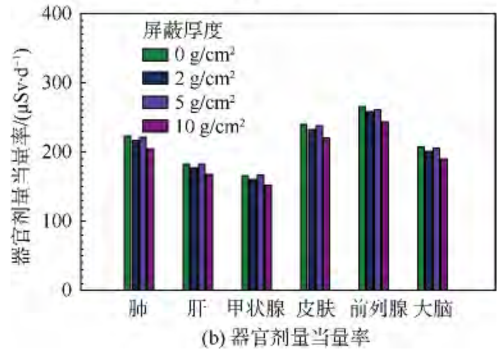


图 8　国际空间站轨道不同屏蔽厚度下航天员受银河宇宙线照射时的器官吸收剂量率和器官剂量当量率

Fig. 8　Astronauts' organ absorbed dose rates and organ dose equivalent rates from exposure by GCR in ISS orbit with various shielding thicknesses

航天员受银河宇宙线照射时，宇宙线各粒子造成的皮肤吸收剂量率和皮肤剂量当量率分别见图 9(a) 和图 9(b). 由图可见，吸收剂量率和剂量当量率主要来自于原子序数小于 29 的银河宇宙线粒子，这些粒子对航天员剂量的贡献占银河宇宙线总剂量的 99.9% 以上. 在这些粒子中，宇宙线 ^{1}H 粒子造成的吸收剂量率最大，而最大剂量当量率来自于宇宙线 ^{56}Fe 粒子.

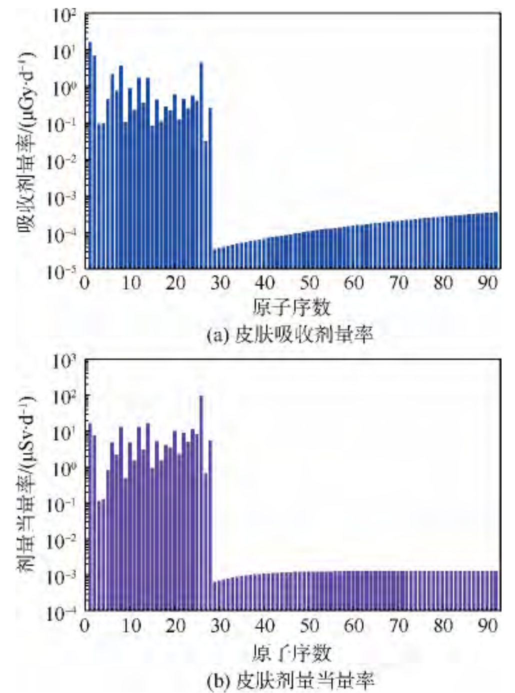


图 9　银河宇宙线不同粒子造成的皮肤吸收剂量率和皮肤剂量当量率

Fig. 9　Skin absorbed dose rates and skin dose equivalent rates from various particles of GCR

计算的航天员受银河宇宙线照射时器官的吸收剂量率与 Puchalska 等[14] 用 PHITS 计算结果比较如图 10，计算结果比 Puchalska 等的结果偏小 20% ~50%，这主要是因为本计算中不考虑银河宇宙线次级粒子辐射的影响.

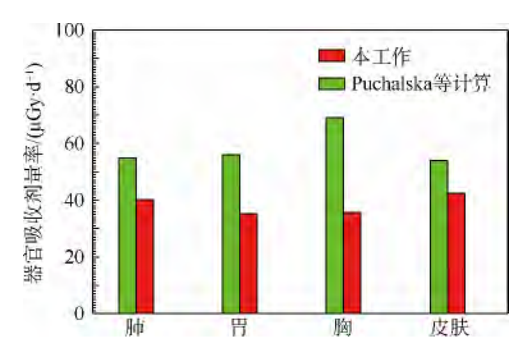


图 10　计算的航天员受银河宇宙线照射的器官吸收剂量率与 PHITS 计算结果比较

Fig. 10　Comparisons of the calculated astronauts' organ absorbed dose rates from exposure by GCR with those from PHITS simulation

3　结　论

1) 根据 ICRP 123 号出版物对航天员辐射剂量评价的建议，采用中国人体数字模型和粒子输运程序获取了航天员受空间粒子($Z = 1 \sim 92$) 辐射时器官的通量-吸收剂量转换因数和通量-剂量当量转换因数. 由于人体模型和计算程序的不同，获得的转换因数与 ICRP 123 号出版物的差别可达数十倍.

2) 计算出航天员在国际空间站轨道受银河宇宙线照射时不同屏蔽厚度下器官的吸收剂量和剂量当量. 器官的吸收剂量在 40 μGy/d 左右，剂量当量约 200 μSv/d. 宇宙线照射的剂量主要来自于原子序数小于 29 的粒子. 随屏蔽厚度增加，剂量并不是单调递减.

参考文献 (References)

[1] Cucinotta F A, Kim M-H Y, Willingham V, et al. Physical and biological organ dosimetry analysis for international space station astronauts [J]. Radiation Research, 2008, 170(1): 127-138.

[2] El-Jaby S, Tomi L, Sihver L, et al. Method for the prediction of the effective dose equivalent to the crew of the international space station [J]. Advances in Space Research, 2014, 53(5): 810-817.

[3] ICRP. Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 26 [R]. New York: Pergamon Press, 1977.

[4] ICRP. 1990 recommendations of the international commission on radiological protection, ICRP Publication 60 [R]. New York: Pergamon Press, 1991.

[5] Cucinotta F A, Nikjoo H, Goodhead D T. Model for radial dependence of frequency distributions for energy imparted in nanometer volumes from hze particles [J]. Radiation Research, 2000, 153(4): 459-468.

[6] ICRP. Assessment of radiation exposure of astronauts in space, ICRP Publication 123 [R]. Amsterdam: Elsevier, 2013.

[7] 曾志, 李君利, 邱睿, 等. 质子剂量微分谱预估空间辐射剂量[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(3): 374-376.
Zeng Z, Li J L, Qiu R, et al. Dose assessment for space radiation using a proton differential dose spectrum [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(3): 374-376 (in Chinese).

[8] 贾向红, 许峰, 黄增信, 等. Monte Carlo 方法在载人航天辐射安全性评价中的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(S1): 1045-1047.
Jia X H, Xu F, Huang Z X, et al. Monte Carlo method in estimating radiation safety for manned spaceflight [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(S1): 1045-1047 (in Chinese).

[9] 曾志, 李君利, 贾向红, 等. 空间辐射剂量及屏蔽效应研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(3): 391-394.
Zeng Z, Li J L, Jia X H, et al. Radiation dose and shielding effects for space radiation [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(3): 391-394 (in Chinese).

[10] Gustafsson K, Sihver L, Mancusi D, et al. Phits simulations of the matroshka experiment [J]. Advances in Space Research, 2010, 46(10): 1266-1272.

[11] Sihver L, Sato T, Puchalska M, et al. Simulations of the matroshka experiment at the international space station using phits [J]. Radiat Environ Biophys, 2010, 49(3): 351-357.

[12] Slaba T C, Qualls G D, Clowdsley M S, et al. Utilization of cam, caf, max, and fax for space radiation analyses using hzetrn [J]. Advances in Space Research, 2010, 45(7): 866-883.

[13] Sato T, Endo A, Sihver L, et al. Dose estimation for astronauts using dose conversion coefficients calculated with the phits code and the icrp/icru adult reference computational phantoms [J]. Radiation Environmental Biophysics, 2011, 50(1): 115-123.

[14] Puchalska M, Sihver L, Sato T, et al. Simulations of MATROSHKA experiment outside the ISS using PHITS [J]. Advances in Space Research, 2012, 50(4): 489-495.

[15] Zhang B, Ma J, Liu L, et al. CNMAN: A Chinese adult male voxel phantom constructed from color photographs of a visible anatomical data set [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2007, 124(2): 130-136.

[16] Li J, Qiu R, Zhang Z, et al. Organ dose conversion coefficients for external photon irradiation using the chinese voxel phantom (cvp) [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2009, 135(1): 33-42.

[17] Liu L, Zeng Z, Li J, et al. Organ dose conversion coefficients on an icrp-based chinese adult male voxel model from idealized external photons exposures [J]. Physics in Medicine and Biology, 2009, 54(21): 6645-6673.

[18] Liu L, Zeng Z, Li J, et al. An icrp-based chinese adult male voxel model and its absorbed dose for idealized photon exposures-the skeleton [J]. Physics in Medicine and Biology, 2009, 54(21): 6675-6690.

[19] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4-a simulation toolkit [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3): 250-303.

[20] Briesmeister J F. MCNP-A general Monte Carlo N-Particle transport code, LA-12625-M [R]. New Mexico: Los Alamos National Laboraroty Report, 1997.

[21] Fasso A, Ferrari A, Ranft J, et al. Fluka: A multi-particle transport code, SLAC-R-773 [R]. Stanford: Stanford University, 2005.

[22] Ziegler J F, Biersack J P. Littmark U. The stopping and range of ions in solids [M]. New York: Pergamon Press, 1985: 1-307.

[23] Cucinotta F A, Kim M-H Y, Chappell L J. Space radiation cancer risk projections and uncertainties-2010, TP-2011-216155 [R]. Maryland: NASA, 2011.

[24] Heynderickx D, Quaghebeur B, Wera J, et al. New radiation environment and effects models in esa's space environment information system (spenvis) [J]. Space Weather, 2004, 2(10): S10S03.

Calculation of the astronauts' radiation dose from galactic cosmic ray

ZHANG Binquan* , YU Qinglong, LIANG Jinbao, SUN Yueqiang, YANG Chuibai, ZHANG Shenyi

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Radiation risk of astronauts during the flight in low earth orbit (LEO) and deep space exploration is mainly from the exposure of galactic cosmic ray (GCR). The radiation dose from GCR is the basis for the assessment of astronauts' radiation risk. In 2013, a new estimation method for the assessment of astronauts' radiation dose was presented by the International Committee on Radiological Protection (ICRP), so as to improve the assessment's accuracy of the radiation dose from heavy ions in space. Based on this method, a Monte Carlo program was developed for simulation of the particle transportation in materials and a voxel phantom of Chinese adult male was realized in this program to represent the astronaut. With this program, the fluence to dose conversion coefficients for the organs of astronauts were calculated for the isotropic exposure by particles with the atomic number from 1 to 92. The radiation dose to astronauts in LEO from GCR was also estimated.

Key words: space radiation; galactic cosmic ray (GCR); astronaut; radiation dose; Monte Carlo